

# TRAVAIL D'ÉQUIPE SCIENTIFIQUE

PIER ROBERTO DANESI ET PAVEL PETER POVINEC

**P**eu après que le Comité consultatif international ait été créé pour superviser l'étude de la situation radiologique des atolls de Mururoa et de Fangataufa en Polynésie française, plusieurs problèmes scientifiques se sont posés. L'un de ces problèmes avait trait à la collecte et à l'analyse des données. La France avait effectué 193 essais d'armes nucléaires entre juillet 1966 et janvier 1996 sur les atolls, et un programme indépendant de prélèvements et d'analyses serait nécessaire. Ce programme servirait plusieurs fins: évaluer la crédibilité des données françaises disponibles et déterminer si la surveillance française offrait une estimation des concentrations et inventaires des radionucléides présents dans les milieux terrestre et marin qui permette de réaliser des évaluations de doses fiables.

La participation des laboratoires de l'AIEA à Seibersdorf (Autriche) et à Monaco (LEM) a été sollicitée en raison de leur grande expérience de la surveillance de la radioactivité des milieux terrestre et marin.

Les campagnes de prélèvements terrestres et marins menées dans le cadre de l'étude se sont déroulées en 1996. Pour évaluer les besoins logistiques de missions dépêchées dans une zone aussi reculée, une équipe technique des laboratoires a visité les atolls en mars 1996. Elle a inspecté d'éventuels sites d'échantillonnage ainsi que des équipements et des installations de laboratoires, et a rencontré les membres du bureau de liaison français et le personnel local. Les programmes d'échantillonnage et

de surveillance ont ensuite été conçus et examinés par le Groupe A d'étude de Mururoa, présidé par le Dr A. McEwan du National Radiological Laboratory de Nouvelle-Zélande. Le groupe réunissait des experts du Danemark, du Japon, de Fidji, d'Australie, des États-Unis, d'Autriche et du Royaume-Uni.

Les campagnes se sont déroulées du 1er juillet au 2 août 1996. Les groupes chargés des prélèvements terrestres et marins ont été renforcés par plusieurs experts internationaux. L'analyse des radionucléides présents dans les échantillons prélevés a été effectuée en partie par les laboratoires de l'AIEA et en partie par un réseau de laboratoires internationaux indépendants.

## LA CAMPAGNE DE PRÉLEVEMENTS TERRESTRES

Le programme de prélèvements a été conçu pour obtenir des échantillons représentatifs de l'environnement. À l'exception de quelques échantillons prélevés dans la région de Colette (atoll de Mururoa), où des particules radioactives ont été étudiées, on a veillé à préparer et à traiter les échantillons de façon que tous les radionucléides soient répartis de façon homogène dans les sous-échantillons finals. En outre, chaque échantillon a été divisé en trois parties. La première a été mesurée par des laboratoires internationaux participants, la deuxième a été envoyée en France et la troisième a été conservée à Seibersdorf. Les protocoles français ont été examinés par le

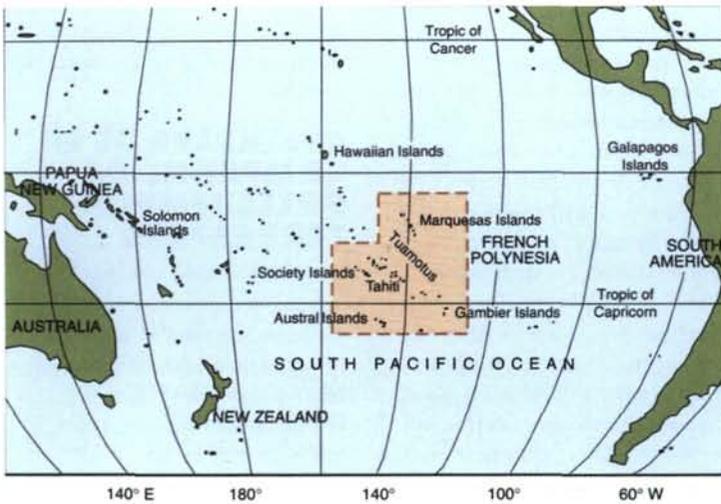
personnel scientifique de Seibersdorf et d'autres experts internationaux. Ils ont été jugés satisfaisants et ont été strictement appliqués dans toutes les procédures d'échantillonnage afin d'assurer une comparabilité raisonnable des résultats avec les données françaises. Les échantillons prélevés ont ensuite été analysés par le laboratoire de Seibersdorf et par des membres du Réseau international de laboratoires d'analyse de la radioactivité environnementale de l'AIEA. Au sein de ce réseau de 53 laboratoires, onze ont été sélectionnés pour analyser les échantillons de Mururoa et de Fangataufa.

**Lieux et échantillons.** Les échantillons ont été prélevés sur quinze sites sélectionnés aussi proches que possible de ceux échantillonnés pendant des années par les campagnes françaises de surveillance de l'environnement. Par ailleurs, quelques échantillons ont été prélevés à Tureia, l'atoll habité le plus proche.

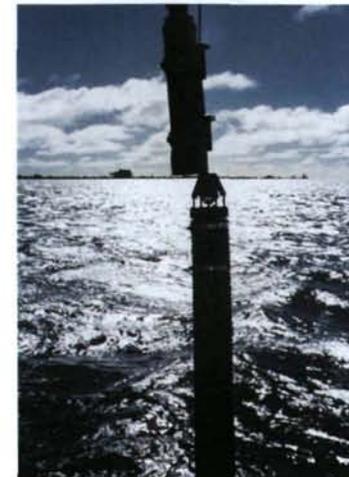
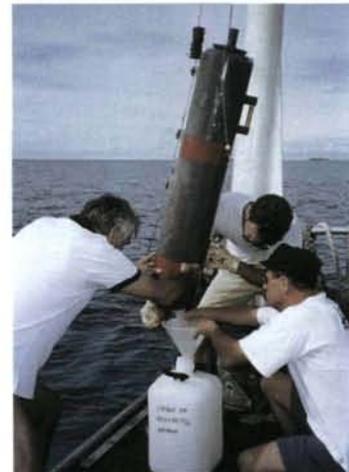
Plusieurs types d'échantillons, 299 au total, ont été prélevés. Une fois les échantillons triés pour connaître leur activité, 198 d'entre eux ont été analysés. Les échantillons (aérosols ou particules radioactives remises en suspension) prélevés par les filtres à air ont été analysés pour évaluer l'exposition potentielle par

---

*M. Danesi est directeur des laboratoires de l'AIEA à Seibersdorf et M. Povinec est chef de la Section de radiométrie au Laboratoire d'étude du milieu marin de l'AIEA à Monaco.*



Location of French Polynesia in the South Pacific Ocean.



Carte: Emplacement des atolls de Mururoa et de Fangataufa dans le Pacifique sud. Les équipes chargées de l'étude ont prélevé quelque 300 échantillons en vue de leur analyse. Photos (en partant du haut, à droite): des membres de l'équipe d'échantillonnage prélèvent une carotte dans l'assise rocheuse de coraux à Fangataufa; des échantillons de roche sont prélevés à Mururoa; de l'eau est prélevée dans le lagon de Mururoa; un spectromètre gamma de fond est déployé dans le lagon de Mururoa; des échantillons de sédiment sont prélevés dans le lagon de Fangataufa.

(Photos: Laboratoires de l'AIEA Seibersdorf, LEM)

inhalation. Les filtres ont été rassemblés quotidiennement et mesurés à Mururoa pour déterminer les valeurs globales du rayonnement bêta et gamma. Ils ont ensuite été envoyés aux laboratoires de Seibersdorf, où l'on a mesuré les valeurs du rayonnement gamma et, après les avoir broyés, déterminé les valeurs globales du rayonnement bêta et gamma.

Des échantillons de terre végétale et des profils verticaux ont été prélevés chaque fois que possible pour estimer la contamination totale en surface et pour évaluer le transfert des radionucléides dans le sol.

Dans les zones dépourvues de terre, on a prélevé des coraux libres et des échantillons de sable. Le sable et les pierres libres des plages sont remués et mélangés par les vagues et les tempêtes. C'est pourquoi il a été jugé qu'un échantillonnage aléatoire suivi d'un mélange destiné à produire un échantillon composite représentant l'ensemble de la zone était la manière la plus satisfaisante d'obtenir des informations objectives.

Des carottes de roches coralliennes ont été prélevées pour étudier la migration vers le bas des radionucléides déposés initialement à la surface. Le profil de concentration verticale a également été un paramètre important pour calculer l'inventaire global des radionucléides à partir de la spectrométrie gamma réalisée *in situ*.

Aucune végétation ni aucun fruit ne poussent sur Mururoa et Fangataufa, à l'exception de quelques rares spécimens cultivés dans de très petits jardins privés utilisant de la terre importée d'autres parties de la Polynésie française. Il a néanmoins été jugé souhaitable d'obtenir quelques informations, même indirectes, sur les caractéristiques du

transfert des radionucléides du sol vers des plantes qui pourraient être cultivées par une population résidente hypothétique. On a donc, en l'absence de légumes et en manière de substitution, échantillonné et analysé des feuilles d'arbres et de buissons. Des données plus précises ont été obtenues pour les noix de coco. Les cocotiers ont été introduits à Mururoa il y a environ un siècle. Comme elles jouent un rôle très important dans l'alimentation des Polynésiens, on a prélevé des noix de coco en plusieurs endroits de Mururoa, à Tureia et dans quelques endroits isolés de Fangataufa. Les noix ont été choisies mûres afin de disposer d'échantillons aussi bien de jus que de chair (copra).

En différents endroits des deux atolls, 106 mesures de spectrométrie gamma *in situ* ont été effectuées à l'aide de détecteurs au germanium de grande pureté. Ces mesures avaient pour but de rassembler des informations sur les inventaires de surface et de sous-sol des radionucléides suivants: plutonium-239, américium-241, cobalt-60, césium-137 et europium-155.

Des analyses de spectrométrie gamma ont été effectuées sur 192 échantillons, tandis que les radionucléides émetteurs alpha et bêta ont été analysés dans 178 échantillons. Les mesures ont été effectuées en double et en triple conformément aux procédures de validation et de contrôle de la qualité. On a ainsi obtenu, au total, 941 mesures individuelles pour les radionucléides émetteurs alpha (plutonium-238, plutonium-239 et 240, et américium-241), 78 mesures pour le strontium-90 et 2520 résultats pour les différents radionucléides émetteurs gamma.

L'ensemble du processus d'échantillonnage, de préparation, de stockage et de distribution a été

mis en œuvre en appliquant de strictes procédures d'assurance de la qualité.

## RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE DE PRÉLEVEMENTS TERRESTRES

D'emblée, il a été admis qu'une campagne qui ne durerait que quelques semaines ne pourrait produire qu'un échantillonnage relativement limité. Il en résulterait inévitablement des écarts, au niveau des concentrations de radionucléides, entre les échantillons ponctuels prélevés pendant la campagne et les ensembles de données bien plus importants accumulés pendant plusieurs années dans le cadre des campagnes de surveillance françaises. Compte tenu de l'expérience passée de l'AIEA en matière d'analyse, on escomptait, pour diverses raisons, un certain nombre d'écarts. Tout chevauchement des plages de valeurs pourrait donc être considéré comme le signe d'une concordance relative.

Les résultats de l'étude de Mururoa ont été comparés aux résultats français pour ce qui concernait les plages d'activité. L'analyse sommaire des plages observées pour le plutonium-239 et 240 et le césium-137 montre que pour la majorité des combinaisons de lieux et de types d'échantillon, les plages se chevauchent et concordent donc de façon satisfaisante. Quelques désaccords, cependant, ont été enregistrés. Bien qu'ils soient relativement insignifiants sur le plan du risque radiologique, il est utile de les examiner brièvement.

Au lieu dit "Irène" (extrémité occidentale du terrain d'aviation), les concentrations mesurées d'activité des aérosols pour les isotopes de plutonium étaient de  $2 \text{ mBq/m}^3$ , tandis que les Français indiquaient une valeur de  $0,11 \text{ mBq/m}^3$ , mesurée à

l'extrémité orientale du terrain d'aviation (Kathie). Cet écart peut être attribué au fait que les Français avaient utilisé certains débris contaminés provenant du lieu dit "Colette" pour la construction de l'aéroport. Il n'était donc pas étonnant qu'une certaine remise en suspension de particules se traduise occasionnellement par une activité élevée dans certains échantillons d'air.

Au lieu dit "Faucon", trois échantillons de terre végétale révélaient des concentrations en plutonium-239 et 240 comprises entre 1200 et 1600 Bq/kg, concentrations nettement supérieures aux valeurs françaises qui, elles, s'échelonnaient de 0,6 à 360 Bq/kg. Cet écart peut être attribué à l'hétérogénéité, à petite échelle, de la répartition des radionucléides dans cette zone.

À proximité de la zone où des essais de sûreté ont été effectués (région de Colette), on a détecté des lieux de radioactivité et des particules radioactives contenant du plutonium-239 et de l'americium-241 (voir article page 43). Les concentrations de plutonium-239 et d'americium-241 mesurées à la surface se sont révélées être deux à six fois plus élevées que les valeurs françaises de 1987. Elles étaient comprises entre 1 et 3 MBq/m<sup>2</sup> pour le plutonium-239 et entre 20 et 70 kBq/m<sup>2</sup> pour l'americium-241.

L'écart a été attribué aux différentes méthodes de mesures utilisées par l'équipe internationale de l'AIEA et par les scientifiques français. L'équipe internationale, qui effectuait une série plus limitée de mesures, recourait à la spectrométrie gamma *in situ*, qui prend plus de temps, et utilisait un détecteur au germanium à haute résolution placé à une distance fixe du sol (un mètre), tirant parti des différentes énergies gamma produites par le plutonium-239 et l'americium-

241. On peut donc considérer que les niveaux d'activité obtenus par l'équipe de l'AIEA sont plus représentatifs de la situation qui prévalait à ce moment là.

Ces mesures ont également montré que le rapport d'activité entre le plutonium-239 et 240 d'une part, et l'americium-241 d'autre part, gravitait autour des deux valeurs de 45 and 60. Cela s'expliquait probablement par les différences d'âge et de pureté du plutonium utilisé dans les essais de sûreté. Il convient de souligner, toutefois, que les débits de dose externes calculés à partir de ces mesures de spectrométrie gamma *in situ* ne représentaient que quelques centaines de microSv par an.

Au lieu dit "Kilo", sur l'atoll de Fangataufa, l'équipe internationale a mesuré les concentrations les plus élevées de césium-137 et de strontium-90 relevées dans la chair et le jus de noix de coco. Ces niveaux d'activité peuvent être considérés comme insignifiants du point de vue du risque radiologique: ils sont nettement (trois fois) inférieurs aux niveaux naturels d'activité du potassium-40 relevés dans tous les échantillons de jus de noix de coco.

Sur l'atoll habité de Tureia, l'équipe a détecté une activité due au plutonium-239 et 240, au césium-137 et au strontium-90 dans des échantillons de sol, de végétation et de noix de coco. En règle générale, les niveaux d'activité étaient tous faibles et sans conséquence radiologique.

En conclusion, les concentrations d'activité mesurées dans le cadre de la campagne de prélèvements terrestres se sont révélées concorder avec les données françaises. On peut donc estimer qu'elles décrivent de façon complète et fiable les quantités de matières radioactives artificielles présentes dans le milieu terrestre des atolls.

## LA CAMPAGNE DE PRÉLEVEMENTS MARINS

Le groupe chargé des prélèvements marins, qui était coordonné par le Laboratoire de l'environnement marin (LEM), avait pour mission d'examiner les données fournies par les autorités françaises concernant les répartitions des radionucléides dans les environnements du littoral et du sous-littoral des atolls. Le double objectif était de mettre en œuvre de nouvelles activités de surveillance suffisantes et indépendantes, sur les atolls et à proximité, afin de valider les données françaises existantes. Dans le même temps, la surveillance fournirait un ensemble de données représentatif et de qualité sur les concentrations des radionucléides présents dans le milieu marin.

L'expédition d'échantillonnage aquatique organisée à Mururoa et à Fangataufa s'est déroulée du 1er au 27 juillet 1996. Les travaux ont consisté à prélever des échantillons adéquats et comparables d'eau, de biote et de sédiments dans les lagons des atolls et dans l'océan entourant ces derniers. Les résultats obtenus, combinés à des données d'intercomparaison antérieures obtenues par l'AIEA en 1994, ont été utilisés pour valider les données bien plus nombreuses obtenues dans le cadre des campagnes de surveillance françaises.

Cinq chercheurs de laboratoires d'États membres de l'AIEA et quatre chercheurs du LEM ont participé à la campagne de prélèvements marins. L'équipe a opéré en parallèle, sur cinq navires simultanément. Les échantillons ont été prétraités dans quatre laboratoires de Mururoa gérés de façon indépendante.

Comme lors de la campagne de prélèvements terrestres, tous les échantillons ont été prélevés en triple. Plus de 300 échantillons ont

été prélevés (eau des lagons, eau de l'océan, eau des pores de sédiments, sédiments, coraux et biote). Quelque 13000 litres d'eau et une tonne d'échantillons solides ont été prélevés, traités, emballés et transportés à Monaco en vue de leur expédition vers dix laboratoires d'analyse répartis dans huit pays.

Le spectrométrie gamma sous-marine a été utilisée pour mesurer l'activité gamma des sédiments *in situ*. L'étude avait pour objet d'identifier les zones les plus contaminées et d'orienter les activités subséquentes d'échantillonnage. Elle a été réalisée à l'intérieur des lagons des atolls de Mururoa et de Fangataufa. La topographie accidentée du fond ne permettant pas de remorquer des dispositifs benthiques, les mesures ont été effectuées suivant un réseau discret de points. Ce réseau était principalement formé de transversales parcourant les zones de très forte contamination identifiées par les Français.

L'équipe a évalué les taux de comptage gamma imputables au cobalt-60 et au césium-137, dont la répartition dans les sédiments des lagons, en raison de différentes origines et géochimies, n'est pas nécessairement identique à celle du plutonium. Des études françaises antérieures avaient, cependant, montré une corrélation entre leur répartition et celle du plutonium.

À l'issue de cette étude, des échantillons ont été prélevés sur les sites identifiés comme représentant des valeurs maximales de contamination locale. Plus tard, des analyses d'étalonnage et de corrélation ont été effectuées pour calculer les inventaires de cobalt-60 et de césium-137 à partir des mesures réalisées *in situ*, ainsi que pour estimer les inventaires de cobalt-60 et de plutonium-239 et 240 dans les sédiments des lagons.

La spectrométrie gamma sous-marine – méthode très

perfectionnée – s'est avérée efficace pour identifier sur place les zones de très forte contamination du fond. Faute d'utiliser cette méthode, il aurait fallu recourir à une longue procédure d'échantillonnage, de préparation des échantillons et de comptage.

Un réseau de laboratoires d'étude du milieu marin a réalisé les analyses. Outre le LEM de l'AIEA, ce réseau réunissait six laboratoires de renommée internationale fournissant des données de qualité en Australie, au Danemark, en Allemagne, en Nouvelle-Zélande, au Royaume-Uni et aux États-Unis. Ces laboratoires avaient tous participé à des exercices réguliers d'intercomparaison organisés par le LEM et avaient fait la preuve, grâce à des tests d'aptitude spécialement conçus, de leur bon niveau de compétence en matière d'analyse.

## RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE DE PRÉLEVEMENTS MARINS

La campagne de prélèvements marins a corroboré les nombreuses données disponibles et a fourni des renseignements scientifiques supplémentaires. Les concentrations d'activité des radionucléides dans le milieu aquatique se sont révélées généralement faibles et comparables aux données françaises communiquées.

Du strontium-90 et du césium-137 résiduels étaient mesurables dans l'environnement des deux lagons, mais leurs concentrations étaient très faibles. Les activités typiques étaient les suivantes: dans l'eau des lagons, environ  $2 \text{ Bq/m}^3$  (à peine supérieure au niveau prévalant généralement dans le Pacifique sud du fait des retombées mondiales); et dans les poissons des lagons, moins de  $0,3 \text{ Bq/kg}$  pour le césium-137 et bien moins pour le strontium-90 (par

comparaison, l'activité du potassium-40 radioactif naturellement présent dans le poisson est de l'ordre de  $100 \text{ Bq/kg}$ ).

Pour des habitants hypothétiques de l'atoll de Mururoa, le principal facteur d'exposition serait le plutonium-239 et 240. Les niveaux de plutonium avoisinaient  $0,3 \text{ Bq/m}^3$  dans les eaux du lagon,  $0,01 \text{ Bq/kg}$  dans le poisson,  $0,08 \text{ Bq/kg}$  dans les crustacés et  $0,8 \text{ Bq/kg}$  dans les mollusques du lagon (près de 100 fois les concentrations de ces radionucléides présentes dans l'océan et dans le biote correspondant de l'océan du fait des retombées mondiales). Ces concentrations d'activité sont toutefois très faibles et n'ont aucune conséquence sur le plan radiologique.

Les analystes ont noté une évolution dans le temps des concentrations de tritium, de strontium-90, de césium-137 et de plutonium-239 et 240 dans l'eau des lagons. Le confinement n'a pas toujours eu la même efficacité lors des 137 essais nucléaires souterrains et il apparaît, vu les concentrations élevées de tritium qui ont persisté pendant quelques années, que des fuites de tritium se sont produites vers les deux lagons. Ce fait a été confirmé par les données fournies par le bureau de liaison français concernant les niveaux de tritium et sa répartition dans les roches carbonatées des deux atolls.

Les mesures effectuées en 1996 indiquent que les niveaux de tritium présents dans les lagons commencent peut-être à chuter (cette évolution pourrait cependant s'inverser pour le lagon de Mururoa, le tritium des essais nucléaires souterrains continuant de migrer vers l'eau du lagon). Actuellement, les niveaux de strontium-90 semblent augmenter légèrement. Les niveaux de

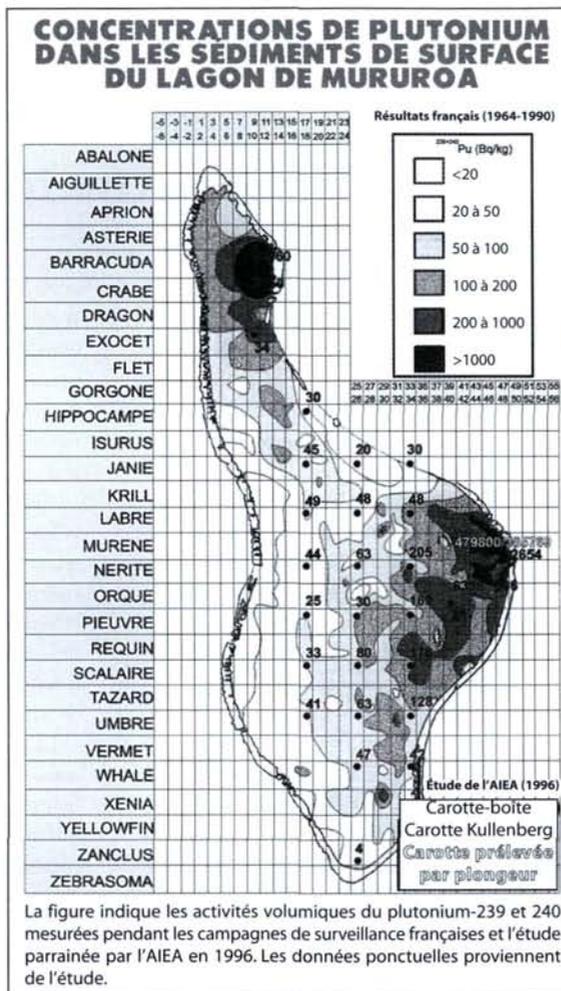
césium-137 et de plutonium-239 et 240 diminuent depuis plusieurs années, et ce plus rapidement qu'on ne l'escomptait du fait de la seule désintégration radioactive.

Le radionucléide dominant observé dans les sédiments de lagons était le plutonium-239 et 240. Ses concentrations de surface oscillaient entre quelques dizaines de Bq/kg de sédiments dans la partie centrale des lagons et quelques milliers de Bq/kg à Denise et Dindon (Mururoa) et à Frégate aux points chauds de Fangataufa subsistant après les essais sur barge. Les concentrations les plus élevées de plutonium-239 et 240 ont été observées à Colette (jusqu'à 50000 Bq/kg) dans les sédiments du rivage contaminés par des essais de sûreté.

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Globalement, les campagnes de prélèvements menées dans le cadre de l'étude de Mururoa ont révélé que les milieux terrestre et marin des atolls de Mururoa et de Fangataufa accessibles à la population contiennent des matières radioactives résiduelles imputables aux essais nucléaires. Ces matières se trouvent cependant en concentrations généralement faibles n'ayant aucune incidence sur le plan radiologique.

On note, en revanche, certains éléments dont les incidences radiologiques peuvent présenter un intérêt:



La figure indique les activités volumiques du plutonium-239 et 240 mesurées pendant les campagnes de surveillance françaises et l'étude parrainée par l'AIEA en 1996. Les données ponctuelles proviennent de l'étude.

■ En règle générale, on a noté une concordance raisonnable entre les résultats de l'étude et les données françaises. On a observé, dans les lagons, une diminution des concentrations de radionucléides par rapport aux données françaises. Les concentrations de radionucléides dans le biote étaient faibles et concordaient avec les données obtenues précédemment par l'AIEA et par la France.

■ Des particules contenant du plutonium et de petites quantités d'américium provenant des essais de sûreté atmosphériques persistent au niveau des sites d'essais – les motus de Colette, Ariel et Vesta sur l'atoll de Mururoa.

■ Des niveaux élevés de césium-137 (environ 1kBq/kg) ont été relevés sur de petites zones totalisant plusieurs hectares sur la ceinture Kilo-Empereur de Fangataufa.

■ Plusieurs kilogrammes de plutonium provenant des essais nucléaires atmosphériques effectués sur les atolls persistent dans les sédiments des lagons. Une partie du plutonium présent dans les sédiments du lagon de l'atoll de Mururoa provient des essais de sûreté atmosphériques. L'inventaire total de plutonium-238, 239 et 240 dans les deux lagons a été estimé à environ 30 TBq. Les inventaires d'américium-241, de césium-137, d'europium-155 et de cobalt- 60 étaient (chacun) inférieurs à 1TBq.

■ Les concentrations de tritium, de strontium-90, de césium-137 et de plutonium-239 et 240 dans chaque lagon se sont révélées supérieures à celles relevées au large du fait de la lixiviation des sédiments (trois derniers radionucléides) et de la contribution de sources souterraines (deux premiers radionucléides). Les taux estimatifs de libération des radionucléides provenant des deux lagons vers le large étaient les suivants (en TBq/an): 6 pour le tritium, 0,03 pour le strontium-90, 0,01 pour le césium-137 et 0,01 pour le plutonium 238, 239 et 240.

■ Les coefficients de distribution et les facteurs de concentration appliqués aux deux lagons se sont révélés correspondre aux plages de valeurs recommandées par l'AIEA. □